

◆ 특집 ◆ 고분자 기반 소프트 액추에이터

탄소 나노 재료 기반의 전기·화학적 구동기

Nano Carbon Material Based Electrochemical Actuators

차주영¹, 강인필^{2,✉}
JuYoung Cha¹ and Inpil Kang^{2,✉}

¹ 부경대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Pukyong National Univ.)

² 부경대학교 기계자동차 공학과 (Mechanical and Automotive Engineering Department, Pukyong National Univ.)

✉ Corresponding author: ipkang@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6167

Manuscript received: 2011.9.24 / Accepted: 2011.10.4

With the help of nanoscale materials like carbon nanotube (CNT), there is the potential to develop new actuators that will provide higher work per cycle than previous actuator technologies, and generate much higher mechanical strength. In this study, the electrochemical actuation characteristics of nano carbon materials were experimentally studied to develop electrochemical actuators. The electrochemical actuators were composed of aqueous NaCl electrolyte and their actuating electrodes were made of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/polystyrene composite and graphene respectively. Actuation is proportional to charging transfer rate, and the electrolysis with an AC voltage input has very complex characteristics. To quantify the actuation property, the strain responses and output model were studied based on electrochemical effects between the nano carbon films and the electrolyte.

Key Words: Carbon Nanotube (탄소나노튜브), Graphene (그래핀), Electrochemical Actuator (전기·화학적 구동기), Artificial Muscle (인공근육), Nano Smart Material (나노 지능형 소재), Nano Composite (나노 복합재료)

1. 서론

기전 구동장치는 전기적 에너지나 전기·화학적 에너지를 구동기를 이용하여 기계적 에너지로 변환하는 장치이다. 이러한 구동장치는 초소형 로봇, 고감도 정밀 스위치, 광학 구동 장치 및 바이오 구동기 등의 고정밀 또는 초소형 구동기로서 광범위한 응용이 가능하므로 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재까지 새로운 형태의 구동기 개발에는 압전체, 형상기억합금 및 이온 전도성 고분자 등을 이용한 구동기가 연구가 되고 있으며 이들의 응용 및 개발에는 비교적 많은 체계적인 연구가 이루어져 있다.¹⁻⁸

이와 같이 다양한 재료적 특성을 지닌 구동기의 개발은 계속되고 있으며 이들 연구의 중심에는 높은 재료의 신뢰성을 지니며 낮은 구동전압과 상대적으로 큰 구동변위를 보이는 우수한 동적 응답 특성을 지닌 구동기의 개발이 관련 연구자들 사이에 여전히 큰 도전적인 과제로 남아있다. 현재 이러한 구동기의 한계를 극복하기 위하여 나노 기술과 더불어 새롭게 등장한 나노 재료를 활용한 지능형 재료와 구동기의 연구 역시 나노 기술의 일부로 연구가 진행되고 있다. 현재까지 개발된 여러 나노 재료들 중에서 탄소 나노 튜브 (carbon nanotubes, CNT)는 육각형 벌집 모양의 탄소들이 이음매가 없는 연속형 구조를 지닌 긴 세장비

(aspect ratio)의 튜브 형상이므로, 우수한 재료적 성질을 지님과 더불어 다양한 지능형 재료로서의 가능성을 보이고 있다.⁹ 또한 CNT는 탄소와 탄소간의 강한 결합으로 이루어져 있으며, 넓은 표면적을 지니고 있어 우수한 에너지 저장 재료로 활용이 될 수 있을 것으로 기대되었다. 이와 같은 특성을 기반으로 탄소와 탄소 결합 사이에 이온을 삽입시켜 그 표면적을 확장시키고 이 현상을 이용하여 변형을 발생시키는 새로운 구동기의 개발이 가능할 것으로 탄소를 연구하는 그룹에서는 예측되어왔으며, 이러한 스트레인 발생 현상이 1999년 Baughman에 의하여 CNT와 전해질을 활용한 새로운 구동기로 연구 발표되었다. 이 구동기는 단일벽 탄소 나노 튜브(Single-walled Carbon Nanotube, SWCNT)를 활용하여 제작한 필름형 전극을 전해질 내에 담근 후 여기에 구동 전압을 가하게 되면 전해질 내에 전기분해로 인하여 이온들이 생성되고 이 생성된 이온이 CNT 전극에 흡착하여 탄소간의 결합을 늘려서 전극의 부피 변화에 의한 구동을 발생시키는 현상을 이용하였다. 이 CNT 구동기는 기존의 구동기보다 낮은 2V 이하의 전압으로 구동이 가능하며 0.2% 이상 변형량과 15Hz 정도의 구동 대역 등을 보여 우수한 구동 효과를 보였다.¹⁰⁻¹³

CNT의 전기화학적 특성을 활용한 구동기는 액상형 전해질을 이용한 제한적인 수중 환경의 구동 조건을 벗어나 공학적인 응용을 위하여 개량된 CNT와 전해질을 이용하여 공기 중에서도 그 우수한 구동 특성을 구현하기 위한 연구개발이 계속하여 이루어지고 있다.^{14,15}

최근 들어 CNT의 재료적 우수성을 지니며 그 공학적 응용 한계성을 극복하기 위하여 2차원 탄소 나노 소재인 그래핀에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그래핀은 CNT의 섬유형 1차원 구조와 달리 탄소들이 2차원의 안정된 평면 구조를 지니고 있으며 1 TPa의 탄성계수(Young's modulus)와 130 GPa 강도 등 우수한 재료적 성질을 지니고 있다.¹⁶ 뿐만 아니라, 나노 재료의 활용을 위한 기능성 재료화 및 활용 공정이 CNT보다 양호하므로 그 응용 연구가 활발히 이루어지고 있다. 따라서 기존의 CNT 구동 연구를 기초로 그 구동재료를 그래핀으로 대체한 전기화학적 구동기 연구가 선행적으로 이루어지고 있다.^{17,18}

따라서 본 논문에서는 우수한 기계적, 전기적, 화학적 특성을 지니고 있어 향후 우수한 활용이

예상되는 탄소 나노 재료를 기반으로 하는 구동기를 기계공학적 활용을 위하여 그 특성을 연구하였다. 현재 많은 연구가 이루어진 다중벽 탄소 나노 튜브(Multi-walled Carbon Nanotube, MWCNT)는 그의 공학적 활용을 높이기 위하여 복합재료화 시킨 후의 구동 특성을 고찰하였다. 그리고 현재까지는 선행적 연구로 일부 수행되고 있는 그래핀 구동기를 그 재료의 순수 구동 특성을 살펴보기 위하여 복합재료가 아닌 버키 페이퍼(bucky paper) 형태로 제작하여 구동 실험을 하였다. 이러한 탄소 나노 구동기의 기계공학적 응용을 위하여는 입력전압에 대한 구동기의 출력 특성 연구가 필수적이다. 그러나 현재까지 탄소 나노 구동기의 이와 관련된 특성 연구는 관련 그룹에서 이루어지고 있지 않으므로 탄소 나노 구동기의 구동 모델 정립을 위한 기초 실험을 진행하였다.

2. 실험

2.1 구동용 복합재료 및 필름 제작

본 연구에서 개발된 CNT 구동기의 전극은 구동전압이 인가될 경우 쉽게 변형이 이루어져야 하므로 유연성 소재인 폴리 스티렌(Polystyrene, PS)을 기저재료(matrix)로 사용하고 MWCNT를 충전재(filler)로 한 복합재료로 제작되었다.

100% CNT로 만들어진 박막 형태의 버키 페이퍼를 이용한 구동전극의 제작은 개개의 CNT 입자들이 버키 페이퍼 내에서 약한 분자간의 결합력인 반데르 발스(Van der Waals) 힘으로만 구속되어 있으므로 그 강도가 약하여 구동전압에 의한 반복적인 변형에 피로 및 균열로 쉽게 손상될 수 있다. 반면에, CNT 복합재료는 기저 재료와 화학적 결합에 의한 높은 강도와 강성을 향상시킬 수 있다. 그러나 나노 튜브와 기저재료간의 결합문제는 나노 복합재료의 기계적 및 전기적인 성질에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 그 메커니즘에는 이종 재료간의 교합(interface) 문제 등과 같은 복잡한 결합 특성들이 존재하므로 이들에 대한 상세한 특성에 대해서는 나노 복합재료학 분야의 별도 연구가 요구된다. SWCNT는 재료의 특성이 MWCNT보다 뛰어나므로 그 구동특성 역시 우수하나 아직은 그 가격이 고가이므로 이를 활용한 공학적 응용이 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 CNT 구동기의 공학적 응용을 위하여 MWCNT를 이용한 구동 전극을 개발하여 특성을 연구하였다.

MWCNT 는 나노 튜브 자체의 직경이 SWCNT 의 수 배에서 수 십배에 달하므로 나노 튜브들이 기저재료의 도움 없이 순수한 반테르 발스 힘으로 결합할 수 없으므로 버키 페이퍼와 같은 나노 튜브만으로 구성된 벌크 재료의 제작이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 복합재료를 MWCNT 와 결합을 위한 기저 재료로 활용하여 다음과 같이 MWCNT /PS 0.5 wt% 벌크 전극을 제작하였다.

탄소 나노 복합 소재를 제작하기 위해서는 기저재료가 점도가 낮은 액체 상태로 되어야 충전재와 혼합이 가능하므로 PS 를 다량의 디메틸포름아미드(Dimethylmethanamide, DMF)를 이용하여 용해시켰다. PS 의 경우 DMF 외에도 아세톤(Acetone)과 메틸렌 클로라이드(Methylene Chloride) 등 대부분의 시약에 잘 용해 되지만 대부분의 탄소 나노의 용

매로 사용되고 있는 DMF 를 사용하여 용해시켰다. 2 시간을 용해시킨 PS/DMF 용액에 MWCNT 를 넣고 교반기를 이용하여 용액이 잘 섞이도록 하였다. 이후, 2 시간 동안 초음파 분산기를 이용하여 나노 튜브들을 용매에 분산시킨다. 분산 공정 후에 용매에 녹아있는 PS/MWCNT 혼합액을 몰드에 주입하기 위하여는 적절한 점도가 요구된다. 따라서 반복적인 공정 실험을 통하여 경험적으로 얻은 최적의 점도가 되는 시간까지 혼합액을 오븐에 넣어 대기압 80° C 환경에서 그 용매를 기화시켰다. 이후 균일한 밀도의 복합소재 전극을 제작하기 위하여 혼합액을 진공오븐에 넣고 20° C 70cmHg 진공 환경에서 10 여분 탈포 과정을 거친 후 준비된 실리콘 몰드에 주입하고 80° C 의 오븐에서 경화시켰다.

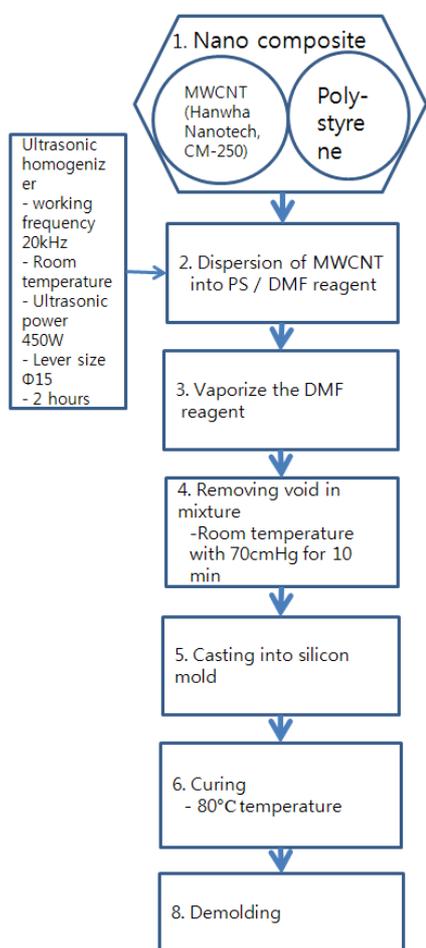


Fig. 1 MWCNT / PS composites fabrication process

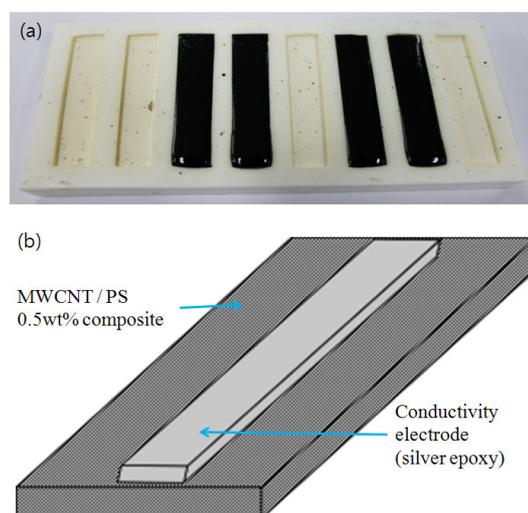


Fig. 2 Fabrication of composite electrodes: (a)MWCNT composite electrodes in a silicon mold and (b) schematic illustration of MWCNT actuator composite electrode (49.03 mm x 8.32 mm x 0.29 mm, $\rho = 591.51 \Omega \cdot m$)

Fig. 1 은 구동전극 제작을 위하여 이용한 MWCNT 기반의 복합소재 공정을 개략적으로 도시한 것이다.

Fig. 2(a)는 복합소재 공정을 통하여 실리콘 몰드를 이용하여 제작된 MWCNT 복합소재 표본 사진이며, Fig. 2(b)는 복합소재를 가공하여 제작된 구동전극의 개략도 이다. 복합소재를 이용한 구동전극은 100% 탄소 나노 소재로 구성된 전극에 비하여 전기적인 전도도가 떨어진다. 따라서 전해질

속에 복합소재 전극을 담그고 구동전압을 인가할 경우, 큰 표면 저항으로 인하여 구동전극 표면에 고르게 이온 흡착의 형성이 안될 수 있으므로 그림과 같이 도전성 실버 에폭시를 이용하여 전극을 가로지르는 전류 공급선을 형성시켜 표면에 다소 균일한 전기장이 형성 될 수 있도록 하였다.

Fig. 3 은 복합소재 전극의 특성을 파악하기 위하여 기저 재료내의 MWCNT 의 분포를 촬영한 SEM 표본이다. 여러 공정을 통하여 제작된 표본들의 SEM 결과에서 본 그림과 유사하게 MWCNT 가 기저재료 내에 비교적 고르게 분포되어 있으므로, CNT 가 복합소재 내에서 양호하게 분포되었다고 판단되었다.

복합재료 기반의 구동전극 제작은 일반적인 나노 복합소재와 유사한 공정이며, 이들 공정은 균일하고 안정된 복합소재를 얻기 위하여 나노 소재

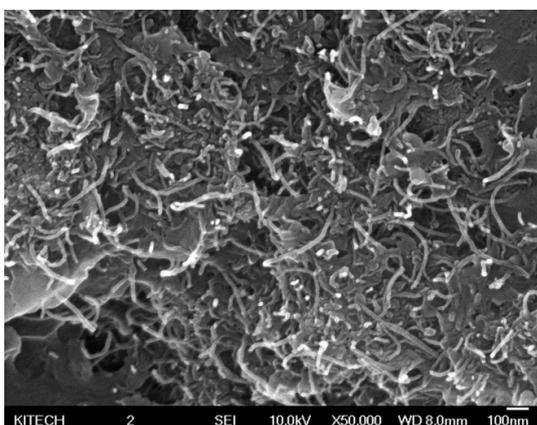


Fig. 3 FE-SEM image of a MWCNT composite(x50,000)

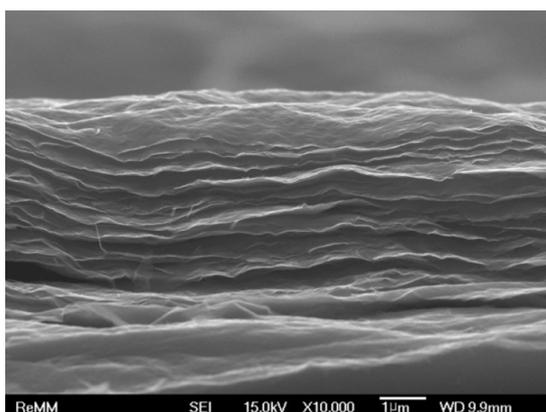


Fig. 4 FE-SEM image of a graphene bucky paper (x10,000)

의 분산, 혼합, curing 및 나노 충전제와 기저재료간의 이종 결합 특성 등 재료과학적으로 지속적인 노력과 연구가 요구되는 공정이다.

본 실험에 이용된 그래핀 구동 전극은 앞서 기술한 복합 소재 제작과 유사하게 그래핀 플레이크 (flake)를 용매인 DMF 에 분산 시킨 현탁액을 여과지(Hyundai Micro, No.53)에 부어 거른 후 그래핀의 잔류 내용물을 진공 오븐에서 건조 시켜 필름형 전극으로 제작하였다. Fig. 4 는 그래핀 전극의 특성 분석을 위한 SEM 표본이다.

3. 구동실험 및 특성

3.1 구동기 구성

탄소 나노 재료 기반의 전기화학적 구동기는 기존의 문헌과 동일하게 수용액 상태의 전해질과 탄소 나노 재료로 제작한 구동 전극을 이용하여 Fig. 5 와 같이 구성하였다.¹⁰ 구동 전극은 스카치 테잎에 부착된 MWCNT/PS 복합전극 과 그래핀 필름을 이용하였으며 이를 구동 이온을 공급할 염화나트륨(NaCl, 5M) 수용액에 담갔다. 이때 구동전극은 전기화학적으로 작업전극(working electrode)에 해당하며, 전해질을 전기 분해시킬 상대전극(counter electrode)은 백금선으로 구성하였다. 스카치 테잎은 구동전극의 불활성 층(inert layer)으로서 전해질 내에서 탄소 나노 구동전극에 구동전압이 인가 되었을 때에 작업전극인 탄소 나노 전극 측에만 이온이 흡착되어 부피가 팽창하나 불활성 층인 테잎면은 부피의 변화가 없으므로 이들 두 층의 부피 변화차이로 구부러짐을 유도하는 단일 물평(uni-morphing) 구동기를 구성한다.

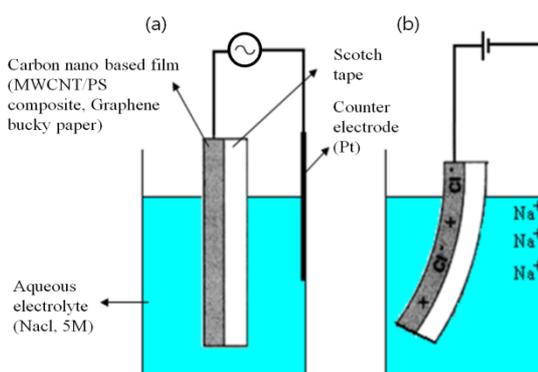


Fig. 5 Nano carbon electrochemical actuator and its schematic actuating mechanism

탄소 나노 전기화학적 구동기의 특성 연구를 위한 구동 변위를 Fig. 6 과 같이 측정 시스템을 구성하여 계측하였다. 구동기의 구동전압과 구동주파수는 함수발생기(HP 33120A)를 이용하여 조절하였다. 이때 MWCNT/PS 복합소재 전극은 전해질의 저항이 크므로 전해질 내에서 전기분해를 통한 이온의 흡착을 위하여는 고전압이 요구되므로 압전 구동에 사용되는 고전압 발생기(TREK Inc., PZD 700)를 추가로 이용하여 80V 의 구동 전압을 생성하여 구동 시켰다. 탄소나노 구동기 전극의 구동 변위는 레이저 변위 측정 장치(Keyence LC2400A, LC2450) 를 이용하여 측정하였으며, 측정된 변위 값을 상응되는 전압값으로 환산하여 오실로스코프의 측정값으로 계측하였다.

3.2 구동 특성

탄소 나노 재료 기반의 전기화학적 구동 특성은 MWCNT/PS 복합재료와 그래핀으로 제작된 구동전극을 염화나트륨 수용액 전해질에 담근 후 AC 구동전압을 인가 한 후 그 구동 변위를 측정함으로써 특성을 분석하였다.

다음 Fig. 7 은 MWCNT/PS 복합소재 전극에 1Hz 5V 의 구형파 구동전압을 고전압 발생기에 인가하였을 때의 결과이다.

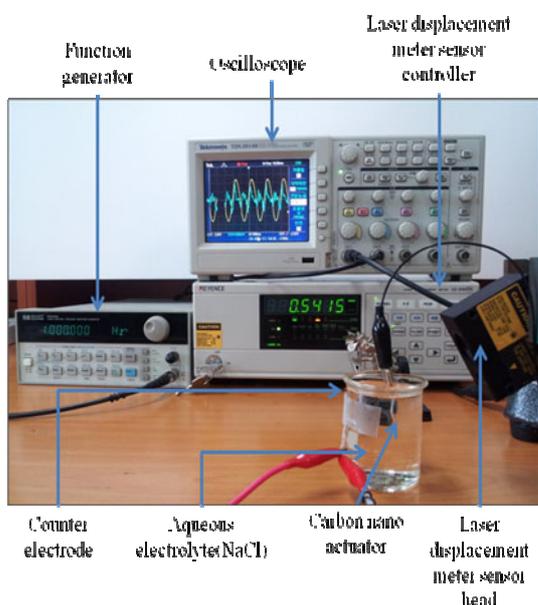


Fig. 6 Experimental setup for nano carbon actuation in aqueous electrolyte

이때 고전압 구동 드라이버는 80V 의 출력 전압을 발생시키며, 레이저 변위계는 구동 변위량에 비례하는 출력전압으로 측정하였다. 본 실험에서 구동전극의 응답이 입력전압에 비하여 다소 늦게 발생하는 것은 구동 특성으로 인한 것이 아니라, 구동전압이 고압 구동 드라이버를 거쳐 발생하는 지연으로 판단된다.

탄소 나노 복합소재 구동전극은 재료의 강성이 있으므로 정현파와 같이 입력 신호가 완만하게 변화하는 구동전압에는 효율적인 변위를 발생시키지 못하였다. 반면에 on-off 형태의 그림과 같이 구형파에서는 날카로운 피크치를 지닌 구동 특성을 보였다. 이러한 현상은 구동 변위가 저주파 성분의 구동입력주파수와 더불어 복합재료의 강성으로 인한 고주파성분이 함께 반영되어 출력이 된다고 추정된다.

Fig. 8 은 그래핀 전극에 1Hz, 5V 의 구형파 구동전압을 고전압 발생기에 인가하였을 때의 결과이며, 이때 그래핀 구동전극은 재료가 복합소재에 비하여 유연하므로 구동변위가 입력 전압의 형태를 비교적 충실하게 추종하였다.

탄소 나노 소자 기반 전기화학적 구동기의 공학적 이용을 위하여는 인가전압에 대한 구동기의 발생 스트레스와 스트레인의 관계식 정립이 요구된다. 즉, 전기화학적 구동기의 발생 변형량을 정량적으로 예측하기 위하여는 입력 전압에 대한 구동 변위 관계가 수식으로 모델링 되고 그 구성 변수들이 실험적 또는 계측에 의한 결과들로부터 도출되어야 한다. 이러한 구동 모델링을 위하여는 구동전극과 전해질내의 이온 간의 전기화학적 상

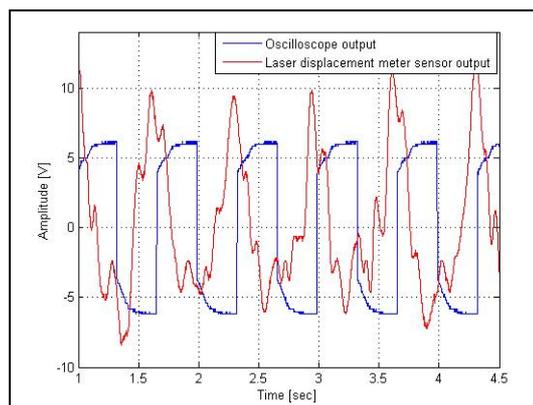


Fig. 7 MWCNT/PS nano composite actuator displacement output

관관계식의 정립이 필요하다. 따라서 Baughman 과 그 동료들에 의하여 이와 같은 연구가 미시적인 관점에서 전해질 내 탄소 나노 입자들의 스트레인 발생 원인을 다음과 같이 연구되었다. 탄소 나노 입자의 발생 스트레인은 동일 농도 전해질내의 구동전극에 가해지는 전압의 세기에 의하여 발생되는 전기화학적 이중층 커패시터(Electrochemical Double Layer Capacitors, EDLC)에 충전되는 전하량에 비례한다고 추정되었다.¹⁹ 또한 전해질의 농도 증가는 구동전극의 전류와 정전용량을 증대시킴으로 전기화학적 구동기의 변위를 증대시킨다고 보고하였다.²⁰

그러나 이러한 구동 발생 메커니즘은 미시적인 전기화학적 모델링에 의존하고 있으므로 기계공학과 같은 응용 학문에는 적합하지 않다고 판단되며 아직은 거시적인 구동모델의 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기계공학과 같은 거시적 응용연구를 위한 모델링 개발을 위하여 아직은 미완인 구동 변위 특성을 정성적인 관점에서 개략적으로 다음과 같이 고찰하였다.

본 구동기의 구동력과 변위는 인가전압과 전해질의 농도에 비례하는 특성을 보이고 있다. 이는 본 구동기가 전해질로부터 공급되는 이온이 구동기의 표면에 흡착과 탈착을 하면서 구동 필름의 표면적을 확장시키는 메커니즘에 근거를 하고 있기 때문이다. 또한 구동 전압이 가해진 구동 필름과 전해질의 경계층 사이에는 EDLC 가 형성되며 이온의 저장고(reservoir) 역할을 수행하고 있으므로, 구동 필름의 정전용량은 이온의 축적도(C_v)와 밀접한 관계가 있다. 따라서 구동기에서 발생시킬 수 있는 스트레인(ϵ)은 시간영역대(time domain)에서 다음과 같은 모델로 추정할 수 있을 것이다.

$$\epsilon(t) = \alpha \cdot C_v \cdot V(t) + \frac{\sigma(t)}{E} \quad (1)$$

여기서 α 는 구동기의 발생 스트레인과 구동 필름의 이온 충전율과의 실험적 비례상수 이다. C_v 는 구동표면에 이온이 흡착될 수 있는 능력이므로 구동 필름의 재료적 특성 및 전해질의 종류와 농도 등에 의하여 결정될 수 있는 매개 변수로서 이에 대한 보다 정확한 규명이 필요하다. $\sigma(t)$ 는 구동기가 발생시키는 응력이고, E 는 구동전극의 탄성 계수이다.

본 연구에서는 탄소 나노 재료 구동기의 정성적인 특성만을 연구하였다. 향후에는 이 구동기의 전해질 용액의 몰 농도에 따른 스트레인 변화량과 전압 및 주파수 변화에 따른 스트레인 변화량의 관계를 정량적으로 규명하는 연구가 진행될 예정이다. 탄소나노 구동기는 구동전극의 정전 용량에 직접적인 영향을 받으므로, 순환전압전류 분석법(cyclic voltammetry)을 이용한 정량적인 측정과 결과 분석이 요구된다. 따라서 향후 그래핀 기반의 구동 전극재료와 CNT 기반의 구동 전극의 특성이 서로 다른 재질의 특성으로 인하여 추가적인 정성적/정량적 실험을 통한 특성 비교가 수행될 계획이다. 그래핀은 CNT 에 비하여 벌크 재료로 개발하였을 때에 그 특성이 우수하므로 전기화학적 구동 전극의 개발에 유리할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 인공근육과 같은 구동기의 개발을 위하여 탄소 나노 소재 기반의 전기화학적 구동기의 특성을 연구하였다. 이를 위하여 현재 나노 기술과 관련하여 많은 연구가 이루어지고 있는 CNT 중 성능대비 가격이 우수한 MWCNT 를 구동 전극으로 개발 하기 위하여 유연성을 지닌 PS 기반의 복합재료로 제작하였으며, 최근 들어 많은 주목을 받고 있는 탄소 나노 소재인 그래핀의 전기화학적 구동 특성을 수용성 전해질 환경에서 실험하였다. 이들 구동기는 구동변위가 입력 전압의 형태를 비교적 충실하게 추종함으로써 새로운 구동기의 개발 가능성을 보여주었다. 향후에는 이 구동기의 용액의 몰 농도에 따른 스트레인 변화량과 전압 및 주파수 변화에 따른 스트레인 변화량의 정량적인 연구가 진행될 예정이다. 향후 그래핀 기반의 구동 전극재료와 CNT 기반의 구동

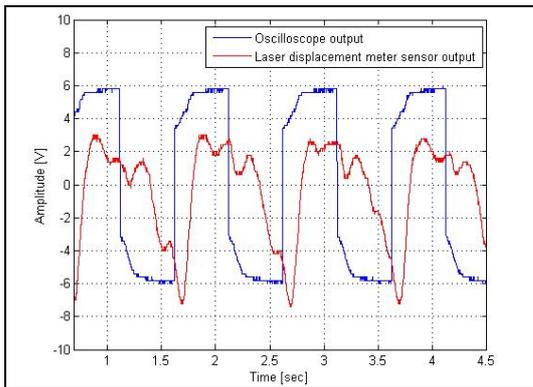


Fig. 8 Graphene actuator displacement output

전극의 특성이 서로 다른 재료의 특성으로 인하여 추가적인 정성적/정량적 실험을 통한 특성 비교가 수행될 계획이다. 그래핀은 CNT 에 비하여 벌크 재료로 개발하였을 때에 그 특성이 우수하므로 전기화학적 구동 전극의 개발에 유리할 것으로 예상된다.

본 연구의 대상인 탄소 나노 구동기는 나노 크기의 소재를 기반으로 제작되므로 나노 스케일의 구조의 제어가 가능할 것으로 기대된다. 또한 이 구동기는 낮은 전압과 간단한 제어 회로로 구동기를 구현할 수 있으므로 향후 MEMS 및 나노 구동장치로 응용이 가능할 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 각각의 탄소 나노 소재들은 작은 변형과 작은 힘을 발생시키지만 이를 벌크 재료 또는 복합 재료화를 시킬 수 있다면 이들을 직렬 또는 병렬로 연결시킨 집단형(multi)구동 시스템의 구성을 통하여 더 강한 구동력과 더 큰 변위를 얻을 수 있을 것이다. 예를 들어 직렬로 길게 연결된 탄소 나노 구동기는 다중 관절 로봇에 필요한 원운동을 달성할 수 있으며 탄소 나노 구동기의 전기 작동을 기반으로 한 집단형 구동기는 유연성을 지니고 있을 뿐만 아니라 인체의 근섬유와 같이 복수로 활용되어 기어나 지렛대와 같은 힘의 증폭기구가 요구되지 않은 적층형 인공 근육으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Son, Y., Takemura, K. and Park, S., "Development of multi-DOF Ultrasonic Motor Using PZT," Journal of KSPE, Vol. 27, No. 4, pp. 53-62, 2010.
2. Tiem, M. T., Kim, J. H. and Goo, N. S., "Design of a Piezocomposite Generating Element and Its Characteristics" Trans. of KSME A, Vol. 34, No. 7, pp. 867-872, 2010.
3. Lee, K. T., Kim, J. S. Kim, H. S. and Ahn, S. H., "Design and Fabrication of a Smart Flexible Structure using Shape Memory Alloy," J. of KSPE, pp. 789-790, 2011.
4. Lee, S. W., Chung, D. K., Song, K. Y., Kim, H. and Chu, C. N., "Manufacturing of Shape Memory Alloy Actuator using Wire EDM," J. of KSPE, pp. 149-150, 2010.
5. Koh, J. S., Jung, G. P. and Cho, K. J., "Development of Biomimetic Gripper Using Shape Memory Alloy Coil Actuator and Composite Materials," J. of KSPE, pp. 591-592, 2010.
6. Kim, S. W., Noh, M. K. and Cho, K. J., "The Flea Inspired Small-scale Jumping Robot with Composite and Shape Memory Alloy(SMA) Spring Actuator," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 193-194, 2010.
7. Kim, S. S., Ki, S. J., Song, H. D., Kim, H. I., Oh, I. K., Yang, S. M. and Kee, C. D., "Development of Bacterial Cellulose Actuator using Conducting Polymer," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 287-288, 2011.
8. Oh, I. K., Jeon, J. H. and Wang, X. L., "Biomimetic Polymer Actuators and Their Applications," Proc. of KSME Spring Conference, pp. 57-60, 2009.
9. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon," Nature, Vol. 354, No. 56, pp. 56-58, 1991.
10. Baughman, R., Cu, C., Zakhidov, A., Iqbal, Z., Barisci, J., Spinks, G., Wallace, G., Mazzoldi, A., De Rossi, D., Rinzler, A., Jaschinski, O., Roth, S. and Kertesz, M., "Carbon nanotube actuators," Science, Vol. 284, No. 5418, pp. 1340-1344, 1999.
11. Gao, M., Dai, L., Baughman, R., Spinks, G. and Wallace, G., "Electrochemical properties of aligned nanotube arrays: basis of new electromechanical actuators," SPIE, Vol. 3987, No. 18, pp. 18-24, 2000.
12. Roth, S. and Baughman, R., "Actuators of Individual Carbon Nanotubes," Current Applied Physics, Vol. 2, No. 4, pp. 311-314, 2002.
13. Spinks, G., Wallace, G., Fifield, L., Dalton, L., Mazzoldi, A., Rossi, D., Kharyullin, I. and Baughman, R., "Pneumatic Carbon Nanotube Actuators," Advanced Materials, Vol. 14, No. 23, pp. 1728-1732, 2002.
14. Fukushima, T., Asaka, K., Kosaka, A. and Aida, T., "Fully Plastic Actuator through Layer-by-Layer Casting with Ionic-Liquid-Based Bucky Gel," Angew. Chem., Vol. 44, No. 16, pp. 2410-2413, 2005.
15. Torop, J., Palmre, V., Arulepp, M., Sugino, T., Asaka, K. and Aabloo, A., "Flexible supercapacitor-like actuator with carbide-derived carbon electrodes," Carbon, Vol. 49, No. 9, pp. 3113-3119, 2011.
16. Lee, C., Wei, W., Kysar J. W. and Hone, J., "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene," Science, Vol. 321,

- No. 5887, pp. 385-388, 2008.
17. Xie, X., Qu, L., Zhou, C., Li, Y., Zhu, J., Bai, H., Shi, G. and Dai, L., "An Asymmetrically Surface-Modified Graphene Film Electrochemical Actuator," ACS Nano, Vol. 4, No. 10, pp. 6050-6054, 2010.
 18. Liang, J., Huang, Y., Oh, J., Kozlov, M., Sui, D., Fang, S., Baughman, R. H., Ma, Y. and Chen, Y., "Electromechanical Actuators Based on Graphene and Graphene/Fe₃O₄ Hybrid Paper," Adv. Funct. Mater., Vol. 21, No. 19, pp. 3778-3784, 2011.
 19. Mazzoldi, A., Rossi, D. D. and Baughman, R., "Electro-mechanical behavior of carbon nanotube sheets in electrochemical actuators," Proc. of SPIE Vol. 3987, pp. 25-32, 2000.
 20. Barisci, J., Wallace, G. and Baughman, R., "Electrochemical studies of sing-wall carbon nanotube in aqueous solutions," Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 488, No. 2, pp. 92-98, 2000.